



DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL,  
PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG,  
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Ab-  
kürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Co-  
des and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der  
PCT-Gazette verwiesen.*

**Veröffentlicht:**

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu ver-  
öffentlichen nach Erhalt des Berichts*

## BESCHREIBUNG

Die Erfindung betrifft ein Verfahren, eine Vorrichtung und ein Computerprogrammprodukt zur Erzeugung eines dreidimensionalen Modells für ein real bestehendes Objekt, insbesondere zur Erzeugung eines Flächen- oder Volumen-  
5 körpermodells oder eines FE-Modells (FE: Finite Elemente) aus digitalisierten Daten des Objekts.

Auf vielen technischen Gebieten besteht der dringende Bedarf, das Abbild eines real bestehenden Objekts in ein  
10 möglichst wirklichkeitsnahes Computermode11 zu überführen. Während sich einfache Objekte meist noch recht gut mit Hilfe von CAD-Programmen (CAD: computerunterstütztes Konstruieren), FE-Programmen oder dergleichen nachkonstruieren lassen, wird dies bei komplizierten  
15 Strukturen immer schwieriger.

Besonders auffällig ist die Diskrepanz zwischen Bedarf und tatsächlich Machbarem in den Biowissenschaften, wenn beispielsweise die hochkomplizierte Gestalt von  
20 anatomischen Strukturen modelliert werden soll. Die geometrischen bzw. morphologischen Ungenauigkeiten des Modells kommen im besonderen Maße dann zum Tragen, wenn auf der Grundlage des Modells eine FE-Analyse durchgeführt werden soll, um das physikalische Verhalten des  
25 Objekts zu berechnen.

Bei der Erzeugung eines aus Knoten und Elementen bestehenden FE-Modells kann prinzipiell zwischen zwei Methoden unterschieden werden, und zwar zwischen der  
30 direkten und der indirekten Erzeugung des FE-Modells. Bei der direkten Methode werden die Knotenpunkte dem FE-Programm fest vorgegeben, während sich das FE-Programm bei der indirekten Methode die Knotenpunkte aus vorge-

gebenen geometrischen Elementen (z.B. aus Flächen- oder Volumenkörpern, Linien oder Punkten) selbst auswählt.

5     Untersucht man die bislang in den Biowissenschaften  
erstellten FE-Modelle, so fällt auf, dass die meisten der  
vorgestellten Verfahren direkte Verfahren sind, bei denen  
dem FE-Programm die Knotenpunkte fest vorgegeben werden.

10    Fig. 13 zeigt ein Beispiel für ein direkt durch  
Konstruktion erzeugtes FE-Modell der Gesichtswichteile,  
wie es M. Motoyoshi et al. in "Finite element model of  
facial soft tissue. Effects of thickness and stiffness on  
changes following simulation of orthognatic surgery",  
J Nihon Univ Sch Dent 35, Seiten 118-123 (1993)  
15    vorgestellt haben. Bei diesem Verfahren wird auf eine  
morphologisch exakte Übertragung der Objektstruktur in  
den virtuellen Raum verzichtet und es wird versucht, die  
Komplexität der Struktur so gut wie möglich durch  
manuelle Nachkonstruktion nachzuahmen.

20    FE-Modelle können auch direkt durch schichtweise  
Vernetzung erzeugt werden. Dabei werden die geometrischen  
Daten des Objekts durch ein schichtdiagnostisches  
Verfahren oder durch Anfertigen histologischer Schnitte  
25    gewonnen.

Bei der punktbasierten, schichtweisen Vernetzung werden  
die gewonnen Schichtbilder digitalisiert und die Grenzen  
der interessierenden Struktur identifiziert. Anschließend  
30    werden in jeder Schicht auf den Grenzlinien Knotenpunkte  
definiert, die zuerst zweidimensional in der jeweiligen  
Schichtlage und anschließend dreidimensional zwischen den  
einzelnen Schichtlagen vernetzt werden. Fig. 14 zeigt ein  
solches durch punktbasierte, schichtweise Vernetzung  
35    erzeugtes FE-Modell eines Zahns, wie es C. Lin et al. in

"Automatic finite element mesh generation for maxillary second premolar", Comput Methods Programs Biomed 59, Seiten 187-195 (1994) beschrieben haben.

- 5 Die schichtweise Vernetzung kann auch voxelbasiert erfolgen. Dazu wird über jedes gewonnene Schichtbild ein definiertes quadratisches Gitternetz gelegt und jedem Quadrat, das in der Schicht einem Voxel entspricht, ein kubisches Element zugeordnet. Jedes Element, das in der
- 10 darunter liegenden Schicht nicht zu einem gewissen Prozentsatz von der interessierenden Struktur bedeckt ist, fällt weg. Übrig bleiben Schichten aus gleichförmigen Elementen, die übereinander gestapelt ein dreidimensionales FE-Modell aus kubischen Elementen
- 15 bilden. Fig. 15 zeigt ein solches durch voxelbasierte, schichtweise Vernetzung entstandenes FE-Modell des menschlichen Schädels, wie es D. Camacho et al. in "An improved method for finite element mesh generation of geometrically complex structures with application to the
- 20 skullbase", J Biomech 30, 1067-1070 (1997) beschrieben haben.

Einen etwas anderen Ansatz haben P. van Zyl et al. in "Three-Dimensional finite element of a human mandible

25 incorporating six osseointegrated implants for Stress Analysis of mandibular cantilever prostheses", Int J Oral Maxillofac Implants 10, Seiten 51-57 (1992) gewählt. Das in Fig. 16 gezeigte FE-Modell eines Unterkiefers wurde direkt durch dreidimensionale Vernetzung einer aus

30 Reflexmikroskopaufnahmen gewonnenen Punktwolke erzeugt. Die Punktwolke wird direkt in das FE-Programm eingegeben, wobei die Punkte der Punktwolke als Knotenpunkte für das FE-Modell herangezogen werden. Allerdings ist die automatische Vernetzung der Knotenpunkte nicht besonders

35 zuverlässig. Die gängigen FE-Programme haben häufig

Schwierigkeiten mit der Vernetzung unterschiedlich dichter Punktwolken, sodass in der Regel spezielle Programme zur dreidimensionalen Vernetzung der Punktwolke verwendet werden müssen. Da diese Programme nicht

5 kompatibel zu den FE-Standardprogrammen sind, entstehen auf der Softwareseite Insellösungen, die nur von einem Fachmann bedient werden können.

Indirekte Verfahren zur Erzeugung eines FE-Modells haben

10 sich in erster Linie in den Ingenieurwissenschaften durchgesetzt. Bei den indirekten Verfahren werden dem FE-Programm beliebige geometrische Elemente vorgegeben, aus denen sich das FE-Programm selbsttätig die Lage der Knotenpunkte errechnet, wobei die geometrischen Elemente

15 lediglich die Ränder und Grenzflächen des späteren FE-Modells festlegen. Die geometrischen Elemente können entweder im FE-Programm selbst erstellt werden oder über eine sogenannte CAD/FEM-Kopplung als Flächen- oder Volumenkörper aus einem CAD-Programm importiert werden.

20 Um die Koordinaten der Knotenpunkte zu erstellen, gibt es bei der indirekten Erzeugung des FE-Modells zwei Möglichkeiten: Beim sogenannten "Mapped Meshing" werden die Knotenpunkte so festgelegt, dass viereckige oder

25 hexaederförmige Elemente gebildet werden. Im Gegensatz dazu werden beim "Free Meshing" dreieckige oder tetraederförmige Elemente mit Zwischenknoten (sogenannte parabolische Elemente) gebildet, die sich besonders gut an komplexe Geometrien anpassen.

30 Der entscheidende Punkt beim indirekten Verfahren ist, dass die dem FE-Programm vorgegeben geometrischen Elemente in der Regel manuell im FE-Programm oder in einem CAD-Programm konstruiert werden müssen. In den

35 Ingenieurwissenschaften stellt dies keinen Nachteil dar,

- da die meisten Produkte sowieso mit Hilfe von CAD-Programmen entworfen werden. In den Biowissenschaften allerdings hat sich das indirekte Verfahren bis auf Ausnahmen, etwa bei der Beurteilung konstruierbarer
- 5 Fremdkörper wie Hüftprothesen usw., nicht durchsetzen können. Die Ungenauigkeiten, die entstehen, wenn ein reales Objekt durch direkte Konstruktion nachgeahmt wird, sind einfach zu groß.
- 10 Den bisher einzigen Lösungsweg, das Abbild eines real bestehenden Objekts in ein der CAD/FEM-Kopplung zugängliches Format umzuwandeln, bietet das Reverse Engineering. Beim Reverse Engineering wird das Objekt digitalisiert und werden mittels Flächenrekonstruktion
- 15 CAD-Flächen erzeugt, die sich dem Grundsatz nach in ein FE-Programm importieren lassen. Die CAD-Flächen setzen sich zumeist aus frei formbaren Bézier- oder NURBS-Patches (NURBS: Nicht-uniforme rationale B-Splines) zusammen, die über ein Netz aus Kontrollpunkten
- 20 stückweise an die Oberflächenform des Objekts angepasst werden. Bei den NURBS-Patches handelt es sich in der Regel um mindestens bikubische parametrische Flächenelemente, die die Objektfläche jeweils durch zwei polynomiale Kurven dritten Grades approximieren. Das Lösen
- 25 der linearen Gleichungssysteme wird mit zunehmendem Grad der Polynome immer aufwendiger, erlaubt aber eine genauere Anpassung der Flächenelemente an die Oberflächengestalt des Objekts. Aufgrund der komplizierten Algorithmen, die bei der Flächenrekonstruktion zum
- 30 Einsatz kommen, sind die zum Reverse Engineering verwendeten Softwareprogramme bislang sehr teuer. Außerdem sind die Berechnungen mit hohem Zeitaufwand verbunden.

Daneben hat sich herausgestellt, dass beim Reverse Engineering die Anpassung der Bézier- oder NURBS-Patches an die Oberflächenform einer geometrisch komplexen Struktur oft sehr ungenau ist und dass dabei häufig  
5 irreguläre CAD-Flächen erzeugt werden, die sich weder mit CAD-Programmen noch mit FE-Programmen weiterverarbeiten lassen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren,  
10 eine Vorrichtung und ein Softwareprogrammprodukt zur Verfügung zu stellen, mit denen sich mit relativ geringem Rechenaufwand ein genaues dreidimensionales Modell eines real bestehenden Objekts erzeugen lässt.

15 Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1, eine Vorrichtung gemäß Anspruch 6 und ein Computerprogrammprodukt gemäß Anspruch 9 gelöst.

Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass das  
20 interessierende Objekt zunächst digitalisiert wird, um ein Netzmodell des Objekts zu erzeugen, das Netzmodell anschließend in bilineare Flächenelemente zerlegt wird und die bilinearen Flächenelemente schließlich zu einem Flächen- oder Volumenkörpermodell vereinigt werden.

25

Unter dem angesprochenen Netzmodell sind Vielflächen-, Oberflächen- oder Polygonnetze zu verstehen, die typischerweise aus einer Menge endlich vieler Polygone bestehen, bei denen jeweils zwei Eck- oder Knotenpunkte  
30 eine Kante definieren und mehrere solcher Kanten einen geometrischen Körper beschreiben. Die geometrische Beschreibung des Körpers erfolgt in dem Netzmodell rein numerisch, d.h. im Gegensatz zu einem analytischen Ansatz wird die geometrische Form nicht durch mathematische

Gleichungen definiert, sondern allein durch die Lage und Dichte der Eck- bzw. Knotenpunkte.

Da solche Netze rein numerisch beschrieben werden, lassen  
5 sie sich durch Digitalisieren des Objekts erzeugen. Das  
Digitalisieren kann dabei auf unterschiedliche Weise  
erfolgen. So kann das Objekt beispielsweise optisch oder  
berührend abgetastet werden, so dass sich eine die  
Objektoberfläche beschreibende Punktwolke ergibt. Aus  
10 dieser Punktwolke werden dann die Knotenpunkte für die  
Netzdarstellung gewonnen. Von dem zu digitalisierenden  
Objekt können aber auch Oberflächen- oder Schnitt-  
aufnahmen angefertigt werden. Mit Hilfe dieser Aufnahmen  
werden dann die Grenzen (Boundaries) des Objekts  
15 identifiziert und werden einzelne Punkte dieser Grenzen  
wiederum als Knotenpunkte für die Netzdarstellung  
verwendet.

Bislang ging man davon aus, dass die numerischen Daten  
20 eines solchen Netzmodells nicht ohne Weiteres dazu heran-  
gezogen werden können, einen Flächen- oder Volumenkörper  
zu erzeugen, der durch analytische Funktionen beschrieben  
wird. So wird in der Literatur zum Beispiel davor  
gewarnt, dass in CAD-Programmen zwar Volumenkörper in  
25 Oberflächennetze konvertiert werden können, diese aber  
umgekehrt nicht in Volumenkörper konvertiert werden  
können (vgl. Benutzerhandbuch AutoCAD 2000™, S. 719). Um  
numerische Daten in analytische Daten umzuwandeln, musste  
bislang der aufwendige und insbesondere bei komplexen  
30 Geometrien nicht immer erfolgreiche Weg des Reverse  
Engineering eingeschlagen werden.

Die Erfindung schlägt eine Brücke zwischen numerischer  
und analytischer Beschreibung der Objektdaten, indem sie



die numerischen Daten des Netzmodells in die analytischen Daten bilinearer Flächenelemente zerlegt.

- Unter bilinearen Flächenelementen sind Flächenstücke zu verstehen, die jeweils durch zwei polynomiale Kurven ersten Grades bzw. durch zwei Strecken definiert sind. Die Endpunkte der Strecken ergeben sich dabei aus den Knotenpunkten des Netzes. Die beiden Strecken jedes Flächenelements bilden zwei Kanten eines Polygonzuges, dessen übrige Kanten sich durch Verbinden der Streckenendpunkte ergeben. Jedes Flächenelement hat seine eigenen Kanten, die es nicht mit den angrenzenden Flächenelementen teilt.
- Die bilinearen Flächenelemente sind vorzugsweise dreieckig, da sich Dreiecksflächen besonders gut an komplexe Geometrien anpassen lassen. Bei einer solchen Dreiecksfläche fällt daher jeweils ein Endpunkt der beiden Strecken des Flächenelements in einem Punkt zusammen und wird die dritte Kante des Dreiecks durch die verbleibenden Endpunkte der Strecken gebildet. Das bilineare Flächenelement kann jedoch prinzipiell auch eine Form mit vier Kanten (z.B. ein Quadrat) einnehmen, bei der die Endpunkte der Strecken nicht in einem Punkt zusammenfallen.

Sofern die bilinearen Flächenelemente durch ein CAD-Programm bearbeitet werden, sollten sie vorzugsweise in Form von NURBS-Patches vorliegen, da NURBS-Patches gegenüber Rotations-, Skalierungs-, Translations- und Projektionsoperationen invariant sind. Dabei ist zu beachten, dass die Möglichkeit, NURBS-Patches höheren Grades frei formen zu können, nicht genutzt wird, da die verwendeten Flächenelemente nur bilinear sind.

Um das Netzmodell in bilineare NURBS-Patches umzuwandeln, wird das Netz vorzugsweise in das IGES-Format (IGES: Initial Graphics Exchange Specification) konvertiert. Das IGES-Format ist ein ANSI-Standard, der ein neutrales

5 Format für den Datenaustausch zwischen unterschiedlichen CAD-, CAM- (CAM: rechnergestützte Fertigung) und Computervisualisierungssystemen definiert. Die bilinearen Flächenelemente entsprechen dabei IGES-Elementen der Nummer 128, die für rationale B-Spline-Flächen vorgesehen

10 sind.

Die einzelnen bilinearen Flächenelemente, in die das Netz zerlegt wurde, werden wieder vereinigt, um einen geschlossenen Flächenverbund oder einen geschlossen

15 Volumenkörper zu erzeugen. Dies geschieht dadurch, dass die gegenüberliegenden Kanten von zwei benachbarten Flächenelementen zusammengeheftet werden. Es werden also die zuvor getrennten Kanten der Flächenelemente zu einer gemeinsamen Kante zusammengefasst, sodass das eine

20 Flächenelement unmittelbar in das andere Flächenelement übergeht. Da sämtliche Flächenelemente eben sind, gehen sie nicht stetig ineinander über und es entsteht ein facettierter Flächenverbund.

25 Dieser facettierte Flächenverbund stellt ein Flächenmodell des digitalisierten Objekts dar. Wenn der Flächenverbund der Oberfläche ein endliches Volumen quasi wasserdicht umschließt, so entsteht ein Volumenkörpermodell des digitalisierten Körpers.

30

Das Flächen- oder Volumenkörpermodell lässt sich problemlos durch CAD/FEM-Kopplung in ein FE-Programm importieren und zu einem FE-Modell vernetzen, mit dessen Hilfe physikalische Berechnungen durchgeführt werden

35 können.

Die Erfindung hat den Vorteil, dass sie für den Übergang zwischen der numerischen und analytischen Beschreibung der Objektdaten Kurvengleichungen ersten Grades heranzieht. Im Vergleich zum Reverse Engineering, bei dem Kurvengleichungen dritten oder höheren Grades verwendet werden, reduziert sich dadurch die Komplexität des zu lösenden Gleichungssystems erheblich. Auch dann, wenn von einem sehr feinen Netz ausgegangen wird, um ein besonders genaues dreidimensionales Modell des interessierenden Objekts zu erzeugen, ist die durch das weniger komplexe Gleichungssystem erzielte Zeitersparnis so groß, dass sich der Rechenaufwand trotz der hohen Genauigkeit des Modells insgesamt verringert. Mit Hilfe der Erfindung lässt sich also mit relativ geringem Rechenaufwand ein genaues dreidimensionales Flächen-, Volumenkörper- oder FE-Modell eines real bestehenden Objekts erzeugen.

Die Erfindung kann sowohl in Form eines Verfahrens als auch in Form einer Vorrichtung oder eines Softwareprogrammprodukts umgesetzt werden.

Bei der Vorrichtung ist zu beachten, dass neben einer Datenverarbeitungseinrichtung, die die Datenverarbeitungsschritte Einlesen des Netzmodells, Zerlegen des Netzmodells in bilineare Flächenelemente, Vereinigen der bilinearen Flächenelemente zu einem Flächen- oder Volumenkörpermodell und gegebenenfalls Erstellen eines FE-Modells aus dem Flächen- oder Volumenkörpermodell ausführt, auch eine Digitalisierungseinrichtung vorgesehen ist, mit der sich das Netzmodell des Objekts erzeugen lässt. Unter eine solche Digitalisierungseinrichtung fallen sämtliche bildgebenden Geräte wie Fotoapparate und Röntgengeräte, die zweidimensionale analoge oder digitale Bilder erzeugen, aus denen in

Kombination mit einer Bildverarbeitung ein dreidimensionales Netz gewonnen werden kann. Unter eine solche Digitalisierungseinrichtung fallen aber auch optische und berührende Abtastgeräte, die die Oberfläche des Objekts abtasten, um eine dreidimensionale Punktwolke zu erzeugen, aus der dann in Kombination mit einer Bildverarbeitung ein Netz gewonnen wird. In diesem Zusammenhang ist es ohne Belang, ob die Digitalisierungseinrichtung und die Datenverarbeitungseinrichtung räumlich getrennt sind oder ob die Digitalisierungseinrichtung die Datenverarbeitungseinrichtung zur Ausführung der Bildverarbeitungsschritte nutzt.

Es liegt auf der Hand, dass die Erfindung anstatt durch die Vorrichtung auch durch ein Computerprogrammprodukt realisiert werden kann, das die angesprochenen Datenverarbeitungsschritte anhand von Softwareroutinen abarbeitet, wenn es auf einem Computer läuft. Das Computerprogrammprodukt kann auf einem Datenträger gespeichert sein oder direkt in den Arbeitsspeicher des Computers geladen werden.

Weitere Aufgaben, Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der folgenden ausführlichen Beschreibung von Ausführungs- und Vergleichsbeispielen. Dabei wird auf die beigefügten Zeichnungen Bezug genommen, die Folgendes zeigen:

Fig. 1 ein durch optische Abtastung digitalisiertes Abbild eines Probandengesichts in Form einer Punktwolke;

Fig. 2 die Punktwolke von Fig. 1, nachdem sie ausgedünnt wurde;

Fig. 3 ein aus der Punktwolke von Fig. 2 erzeugtes Netz;

Fig. 4 ein Ausschnitt aus dem in Fig. 3 gezeigten Netz;

Fig. 5a bis Fig. 5d eine erläuternde Darstellung, wie aus  
5 drei Polygonen des in Fig. 4 gezeigten Ausschnitts drei  
bilineare Flächenelemente gebildet und wieder vereinigt  
werden;

Fig. 6 ein aus dem in Fig. 3 gezeigten Netz erzeugtes  
10 Flächenmodell;

Fig. 7 ein aus dem in Fig. 6 gezeigten Flächenmodell  
erzeugtes FE-Modell der Gesichtswichteile;

15 Fig. 8 eine digitalisierte Röntgenschichtaufnahme eines  
menschlichen Schädels in Höhe des Unterkiefers, in denen  
die Schädelgrenzen markiert und mit Punkten versehen  
sind;

20 Fig. 9 ein aus mehreren Schichtaufnahmen erzeugtes  
digitales Abbild eines Schädels in Form einer Punktwolke,  
nachdem sie homogenisiert wurde;

Fig. 10 ein aus der Punktwolke von Fig. 9 erzeugtes Netz;  
25

Fig. 11 ein aus dem in Fig. 10 gezeigten Netz erzeugtes  
Volumenkörpermodell des Schädels;

Fig. 12a ein Netzmodell des menschlichen Ohres und  
30 Fig. 12b ein aus diesem Netzmodell durch Reverse  
Engineering erzeugtes Modell aus NURBS-Flächen;

Fig. 13 ein durch Nachkonstruktion erzeugtes FE-Modell  
von Gesichtswichteilen gemäß Stand der Technik;

Fig. 14 ein durch punktbasierte, schichtweise Vernetzung erzeugtes FE-Modell eines Zahns gemäß Stand der Technik;

Fig. 15 ein durch voxelbasierte, schichtweise Vernetzung erzeugtes FE-Modell eines menschlichen Schädels gemäß Stand der Technik; und

Fig. 16 ein durch Vernetzung einer Punktwolke erzeugtes FE-Modell eines Unterkiefers gemäß Stand der Technik.

10

Anhand der Figuren 1-7 wird nun ein erstes Ausführungsbeispiel beschrieben, wie sich aus einem digitalisierten Abbild eines Probandengesichts ein dreidimensionales Flächenmodell und ein FE-Modell der menschlichen Gesichtsteile erzeugen lassen.

15

Das Gesicht eines Probanden wurde mit Hilfe eines lichtcodierten Triangulationsverfahrens (TRICOLITE™ der Firma Steinbichler) digitalisiert. Dabei wurde durch einen LCD-Projektor eine Serie von Streifenmustern auf das Gesicht geworfen, die durch zwei CCD-Kameras aus unterschiedlichen Blickwinkeln erfasst wurde. Der komplette Messvorgang dauerte etwa zwei Sekunden. Durch geometrische Auswertung (Triangulationsprinzip) wurde daraus ein dreidimensionales Abbild der Gesichtsoberfläche in Form einer Punktwolke erzielt. Nähere Einzelheiten zu diesem lichtcodierten Triangulationsverfahren werden der Dissertation (citation in progress) von C. Holberg "Erfassung von Gesichtsoberflächen durch ein lichtcodiertes Triangulationsverfahren", Ludwig-Maximilians-Universität München (2002) zu entnehmen sein.

20

25

30

Die erhaltene Punktwolke wurde anschließend gefiltert, um eine bestimmte Auflösung zu erzielen und redundante Daten einzusparen. Und zwar wurden die Bildpunkte, deren Lage

35

gegenüber den benachbarten Bildpunkten nur wenig abwich, gelöscht, während die Bildpunkte, deren Lage gegenüber den benachbarten Bildpunkten stärker abwich, beibehalten wurden. Dadurch ergab sich die in Fig. 2 gezeigte  
5    ausgedünnte Punktwolke, in der die Bildpunkte umso dichter liegen, je stärker sich die Topologie der Gesichtsoberfläche ändert.

Die ausgedünnte Punktwolke wurde anschließend in das  
10   Bildbearbeitungsprogramm Rapid Form™ (INUS Technology, Inc.) importiert und zu einem Polygonnetz aus dreieckigen Polygonen vernetzt. Um ein durchgehendes, sauberes Polygonnetz zu erhalten, wurde das Polygonnetz von Löchern und von kreuzenden, redundanten und nichtmannigfaltigen Flächen befreit. Im vorliegenden Fall wurde die  
15   Möglichkeit, das Polygonnetz zu homogenisieren oder die Anzahl der Polygonflächen zu erhöhen oder zu reduzieren, nicht genutzt. Es entstand das in Fig. 3 gezeigte lochfreie und gereinigte Polygonnetz, das im DXF-Format  
20   zwischengespeichert wurde.

Das im DXF-Format abgespeicherte Polygonnetz wurde anschließend in das Programm PolyTrans™ (Okino Computer Graphics) importiert, um das Polygonnetz, ohne weiter  
25   verändert zu werden, im neutralen IGES-Format abzuspeichern, das den Datenaustausch zwischen unterschiedlichen CAD-, CAM- und Computervisualisierungssystemen erlaubt. Durch den Export als IGES-Datei wurde das Polygonnetz in bilineare NURBS-Patches mit der  
30   Elementnummer 128 zerlegt. Die entstandene IGES-Datei wurde anschließend in das CAD-Programm Mechanical Desktop™ (Autodesk Inc.) eingelesen, wobei das Abbild des Probandengesichts nunmehr in Form von einzelnen Flächenelementen (bilinearen NURBS-Patches) vorlag, die jeweils  
35   einem Polygon des ursprünglichen Polygonnetzes

entsprachen. Mit der Funktion "Flächen zusammenheften" (in anderen Programmen auch als "Zusammenfügen" oder "Stitchen" bezeichnet) wurden die einzelnen Flächenelemente dann wieder zu einem Flächenverbund vereinigt, sodass das in Fig. 6 gezeigte Flächenmodell des Probandengesichts entstand. Dieses Flächenmodell wurde dann über die CAD/FEM-Schnittstelle AMACISOUT des Programms im SAT-Format exportiert, um die Geometrie des Flächenmodells der CAD/FEM-Kopplung zugänglich zu machen.

Die einzelnen Verarbeitungsschritte, denen die Bilddaten beim Zerlegen des Polygonnetzes in die einzelnen Flächenelemente und beim Vereinigen der Flächenelemente unterlagen, werden nun ausführlicher anhand von Fig. 4 und den Figuren 5a bis 5d erläutert.

Fig. 4 zeigt einen Ausschnitt des in Fig. 3 gezeigten Polygonnetzes, der dem rechten Wangenbereich des Patienten entnommen wurde. In diesem Bereich werden nur die drei fett markierten Polygone betrachtet, deren Eck- bzw. Knotenpunkte hervorgehoben sind. Diese drei Polygone sind in Fig. 5a ohne ihre Umgebung dargestellt.

Die in Fig. 5a dargestellten Polygone wurden durch die Konvertierung ins IGES-Format in die drei in Fig. 5b gezeigten bilinearen NURBS-Patches umgewandelt. Unter NURBS-Patches sind wie gesagt Flächenelemente zu verstehen, die jeweils durch zwei nicht-uniforme rationale B-Splines definiert sind, d.h. durch zwei frei formbare polynomiale Kurven. Da die Polygone, von denen ausgegangen wurde, eben waren, sind die beiden B-Splines, die jedes Flächenelement definieren, ebenfalls nicht gekrümmt und entsprechen somit Kurven ersten Grades. Bei der Erfindung wird also jedes NURBS-Patch nicht mehr numerisch durch die Eckpunkte des jeweiligen Flächen-



elements, sondern analytisch durch zwei Kurven ersten Grades bzw. durch zwei Strecken beschrieben. Da die ursprünglichen Polygone dreieckig waren, sind auch die entstandenen NURBS-Flächen dreieckig. Das bedeutet, dass  
5 jeweils ein Endpunkt der beiden Strecken des NURBS-Patches in einem Punkt zusammenfällt und die beiden Strecken zwei Kanten des dreieckigen NURBS-Patches bilden, während sich die dritte Kante durch Verbinden der beiden verbliebenen Streckenendpunkte ergibt. Da jeder  
10 NURBS-Patch durch ein eignes Paar linearer B-Splines definiert ist, hat jedes NURBS-Patch seine eigenen Kanten, die es nicht mit den angrenzenden Flächen-elementen teilt.

15 Die einzelnen NURBS-Patches wurden dann durch die Zusammenheftfunktion wie in Fig. 5c und Fig. 5d gezeigt jeweils mit den benachbarten NURBS-Patches vereinigt. Das Zusammenheften erfüllt dabei zwei Aufgaben: Zum einen werden mit dieser Funktion zwei oder mehr zusammen-  
20 hängende Flächen zusammengeheftet, um einen Flächenverbund zu erstellen, und zum anderen werden Fehler in der Geometrie oder Topologie, die während der Konvertierung aufgrund von unterschiedlichen internen Toleranzen und Berechnungsfehlern auftreten können,  
25 korrigiert. Durch das Zusammenheften entsteht also ein durchgängiger Flächenverbund, der als Flächenmodell herangezogen werden kann.

Das in Fig. 6 gezeigte, über die CAD/FEM-Schnittstelle  
30 exportierte Flächenmodell des Probandengesichts wurde in das FE-Programm Design Space™ von Ansys, Inc. importiert. Das Flächenmodell wurde dabei wie ein gekrümmtes Flächen-tragwerk behandelt, das sich nach der Schalentheorie verhält. Nach Zuweisung einer einheitlichen Dicke wurde  
35 das Konstrukt zu dem in Fig. 7 gezeigten dreidimensiona-

len FE-Modell der Gesichtsweichteile vernetzt. Die Vernetzung erfolgte ohne Schwierigkeiten, da fehlerhafte Flächen bereits während der Reinigung des Polygonnetzes beseitigt wurden, sodass es zu keinen Überschneidungen kam. Das FE-Modell wies im Großen und Ganzen die gleiche hohe Auflösung wie das Polygonnetz und das im CAD-Programm erstellte Flächenmodell auf. Durch Festlegung entsprechender Lagerungen und Lasten ließen sich mit diesem FE-Modell hochauflösend Verformungen, Spannungen und Dehnungen in den Gesichtsweichteilen berechnen. Diese Berechnungen können zum Beispiel für die Planung kosmetischer Operationen genutzt werden.

Anhand der Figuren 8-11 wird nun ein zweites Ausführungsbeispiel beschrieben, wie sich aus digitalisierten Schichtbildern eines menschlichen Schädels ein dreidimensionales Volumenkörpermodell erzeugen lässt.

Von dem Schädel eines Probanden wurde mit Hilfe eines Computertomografieverfahrens ein Satz von zweiundvierzig digitalen Röntgenschnittbildern gewonnen. Mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms 3D-Doctor™ (Able Software) wurden in den Schichtaufnahmen die Grenzen des Schädelknochens identifiziert und die markierten Grenzlinien mit mehreren Punkten versehen. Fig. 8 zeigt ein Beispiel eines solchen mit Grenzlinien und Punkten versehenen Schichtbilds im Bereich des Unterkieferknochens.

Die in den einzelnen Schichtbildern markierten Punkte wurden dann zu einer dreidimensionalen Punktwolke zusammengefasst, die redundanten Daten durch Filtern mit einer bestimmten Auflösung entfernt und die verbleibende Punktwolke homogenisiert. Daraus ergab sich die in Fig. 9 gezeigte ausgedünnte Punktwolke, in der die Bildpunkte

umso dichter liegen, je stärker sich die Topologie der Schädeloberfläche ändert.

Die ausgedünnte Punktwolke wurde anschließend zu einem  
5 Polygonnetz aus dreieckigen Polygonen vernetzt und das  
Polygonnetz von kreuzenden, redundanten und nichtmannig-  
faltigen Flächen gereinigt. Eventuell entstandene Löcher  
wurden wieder geschlossen. Das sich ergebende Polygonnetz  
ist in Fig. 10 gezeigt.

10

Das Polygonnetz wurde dann ähnlich wie im ersten  
Ausführungsbeispiel in das Programm PolyTrans™ (Okino  
Computer Graphics) importiert und in bilineare NURBS-  
Patches mit der Elementnummer 128 zerlegt, die  
15 anschließend wieder unter Korrektur der aufgetretenen  
Geometrie- oder Topologiefehler zu einem Flächenverbund  
zusammengeheftet wurden. Da bereits das Polygonnetz frei  
von Löchern war und der Flächenverbund daher der  
durchgehenden Oberfläche eines in sich geschlossenen  
20 festen Körpers (Solid) entsprach, wurde beim Zusammen-  
heften automatisch ein Volumenkörpermodell erzeugt. Das  
fertige Volumenkörpermodell ist in Fig. 11 gezeigt und  
hat im Großen und Ganzen die gleiche hohe Auflösung wie  
das ursprüngliche Polygonnetz, sodass es für ein hoch-  
25 auflösendes FE-Modell geeignet ist. Das entstandene FE-  
Modell konnte zur Simulation der Auswirkungen von  
Gewalteinwirkungen auf den Schädel herangezogen werden.

Die obigen Ausführungsbeispiele zeigen, dass sich mit der  
30 Erfindung hochgenaue dreidimensionale Modelle real  
bestehender Objekte erzeugen lassen.

Ein Vergleich der Erfindung mit dem herkömmlichen  
Verfahren des Reverse Engineering soll außerdem den

Nachweis bringen, dass sich mit der Erfindung auch der Rechenaufwand senken lässt.

Hierzu wurde von einem aus 3386 dreieckigen Polygonen  
5 bestehenden Netzmodell des menschlichen Ohres ausgegan-  
gen. Das in Fig. 12a gezeigte Netz wurde zum einen nach  
den Maßgaben der Erfindung und zum anderen mit Hilfe der  
Reverse-Engineering-Funktion des Programms Rapid Form™  
(INUS Technology, Inc.) in NURBS-Patches der IGES-  
10 Elementennummer 128 umgewandelt. In beiden Fällen wurden  
die 3386 Polygone in ebenso viele NURBS-Patches  
umgewandelt. Im Fall des Reverse Engineering wurde  
außerdem ein Modell mit einer geringeren Auflösung von  
232 NURBS-Patches angefertigt, das in Fig. 12b gezeigt  
15 ist. Die Berechnungszeit und der Speicherbedarf für die  
einzelnen Modelle lassen sich Tabelle 1 entnehmen.

Tabelle 1

	NURBS Anzahl	Rechen- zeit	Speicherbedarf (unkomprimiert)	Speicherbedarf (komprimiert)
Erfindung	3386	2,9 s	1,2 MB	0,4 MB
Reverse Engineering	3386	1983 s	29,6 MB	16,1 MB
Reverse Engineering	232	98 s	2,0 MB	1,1 MB

20

Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass das erfindungsgemäße  
Verfahren verglichen mit dem Reverse Engineering bei  
gleicher Auflösung (d.h. bei gleicher Anzahl an NURBS-  
Patches) deutlich weniger Rechenzeit und Speicherbedarf  
25 erfordert. Wenn beim Reverse Engineering die Anzahl an  
NURBS-Patches gesenkt wird, lassen sich zwar die Rechen-  
zeit und der Speicherbedarf reduzieren, doch werden  
dadurch geometrische Ungenauigkeiten in Kauf genommen.

Wie der Vergleich der Figuren 12a und 12b ergibt, erzeugt das Reverse Engineering zwar sehr glatte Oberflächenübergänge, doch kann es insbesondere im Randbereich des Modells zu fehlerhaften Darstellungen kommen (siehe Pfeil in Fig. 12b). Die Ungenauigkeiten im Randbereich sind umso auffälliger, je komplexer die nachzubildende Struktur ist und je geringer beim Reverse Engineering die Auflösung (Anzahl der erzeugten NURBS-Patches) ist. Vergleichbare Darstellungsfehler treten bei der Erfindung nicht auf.

Darüber hinaus stellte sich heraus, dass die durch das Reverse Engineering erzeugten NURBS-Patches insbesondere dann, wenn das Patch-Layout automatisch erstellt wurde, zu irregulären, fehlerhaften und vertwisteten CAD-Flächen führten, die nicht (z.B. über CAD/FEM-Kopplung) weiterverarbeitet werden konnten. Da die manuelle Erstellung des Patch-Layouts zeitaufwendig, fehlerträchtig und in der Regel nur vom Fachmann zu bewerkstelligen ist, bietet das Reverse Engineering keine praxisgerechte Alternative, um aus digitalisierten anatomischen Strukturen wie dem in Fig. 12a gezeigten Ohr FE-Modelle zu erzeugen.

Wie sich aus der obigen Beschreibung ergibt, eignet sich die Erfindung nicht nur als hochgenaues, Zeit und Speicherplatz einsparendes Alternativverfahren für das Reverse Engineering, sondern erschließt die Erfindung auch neue Anwendungsbereiche bei der Modellierung hochkomplexer Objekte, etwa in den Biowissenschaften, die dem Reverse Engineering und anderen herkömmlichen Verfahren bislang nicht zugänglich waren.

**PATENTANSPRÜCHE**

1. Verfahren zur Erzeugung eines dreidimensionalen Modells für ein real bestehendes Objekt, mit den Schritten:

5 Digitalisieren des Objekts, um ein Netzmodell des Objekts zu erzeugen;

Zerlegen des Netzmodells in bilineare Flächenelemente; und

Vereinigen der bilinearen Flächenelemente zu einem Flächen- oder Volumenkörpermodell des Objekts.

10

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die bilinearen Flächenelemente dreieckig sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die  
15 bilinearen Flächenelemente NURBS-Patches sind.

4. Verfahren nach Anspruch 1, mit dem Schritt Erstellen eines Finite-Elemente-Modells aus dem Flächen- oder Volumenkörpermodell.

5. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Netzmodell aus Punktwolkendaten des Objekts gewonnen wird.

5 6. Vorrichtung zur Erzeugung eines dreidimensionalen Modells für ein real bestehendes Objekt, mit:

einer Digitalisierungseinrichtung, mit der sich ein Netzmodell des Objekts erzeugen lässt; und

10 einer Datenverarbeitungseinrichtung zur Durchführung folgender Datenverarbeitungsschritte: Einlesen des Netzmodells; Zerlegen des Netzmodells in bilineare Flächenelemente; und Vereinigen der bilinearen Flächenelemente zu einem Flächen- oder Volumenkörpermodell des Objekts.

15

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, bei der die Datenverarbeitungseinrichtung aus dem Flächen- oder Volumenkörpermodell ein Finite-Elemente-Modell des Objekts erstellt.

20

8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, bei der die Datenverarbeitungsschritte in der Datenverarbeitungseinrichtung anhand von Softwareroutinen abgearbeitet werden.

25

9. Computerprogrammprodukt zur Erzeugung eines dreidimensionalen Modells für ein real bestehendes Objekt, das anhand von Softwareroutinen folgende Datenverarbeitungsschritte abarbeitet, wenn es auf einem

30 Computer läuft: Einlesen eines Netzmodells des Objekts; Zerlegen des Netzmodells in bilineare Flächenelemente; und Vereinigen der bilinearen Flächenelemente zu einem Flächen- oder Volumenkörpermodell des Objekts.

10. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 9, das die bilinearen Flächenelemente erzeugt, indem es das Netzmodell des Objekts durch Konvertierung ins IGES-Format in bilineare NURBS-Patches zerlegt.

5

11. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 10, bei dem das ins IGES-Format konvertierte Netzmodell ausschließlich IGES-Flächenelemente der Nummer 128 enthält.

10

12. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 9, das aus dem Flächen- oder Volumenkörpermodell durch CAD/FEM-Kopplung ein Finite-Elemente-Modell des Objekts erstellt.



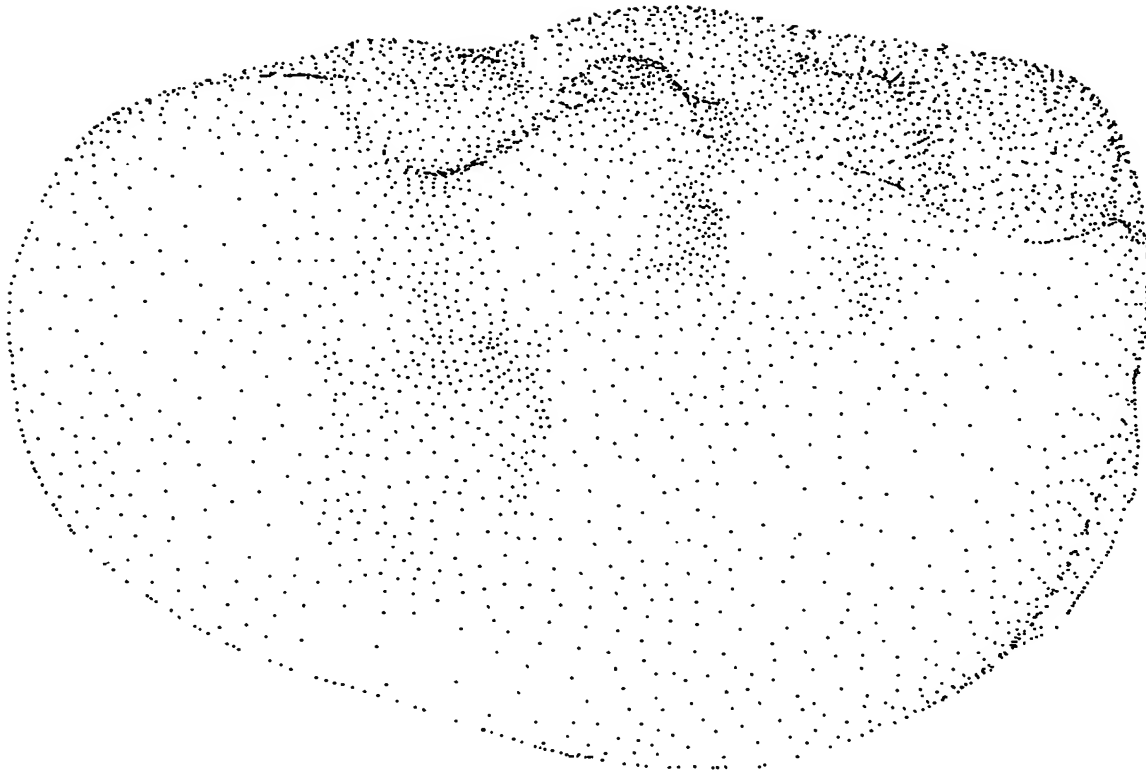


FIG. 2



FIG. 1

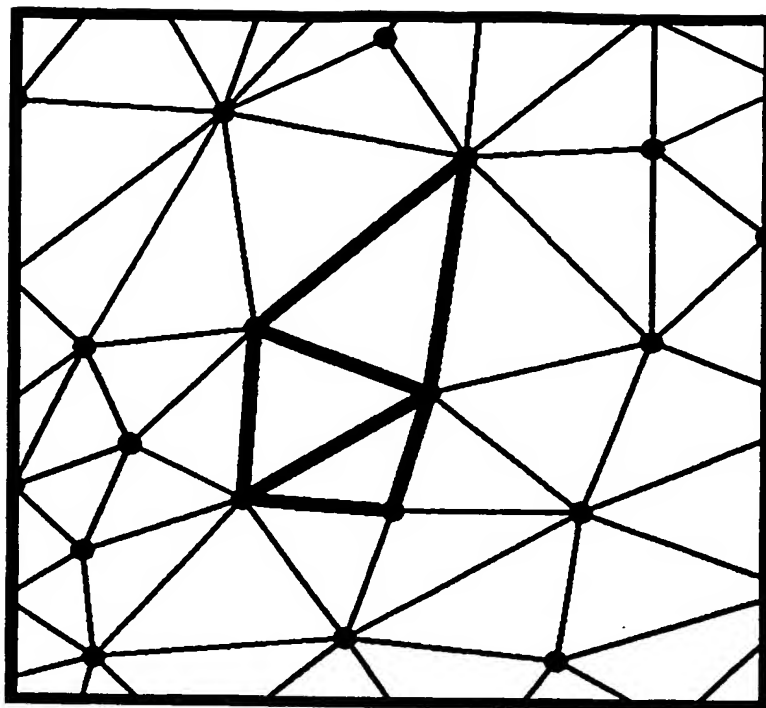


FIG. 4

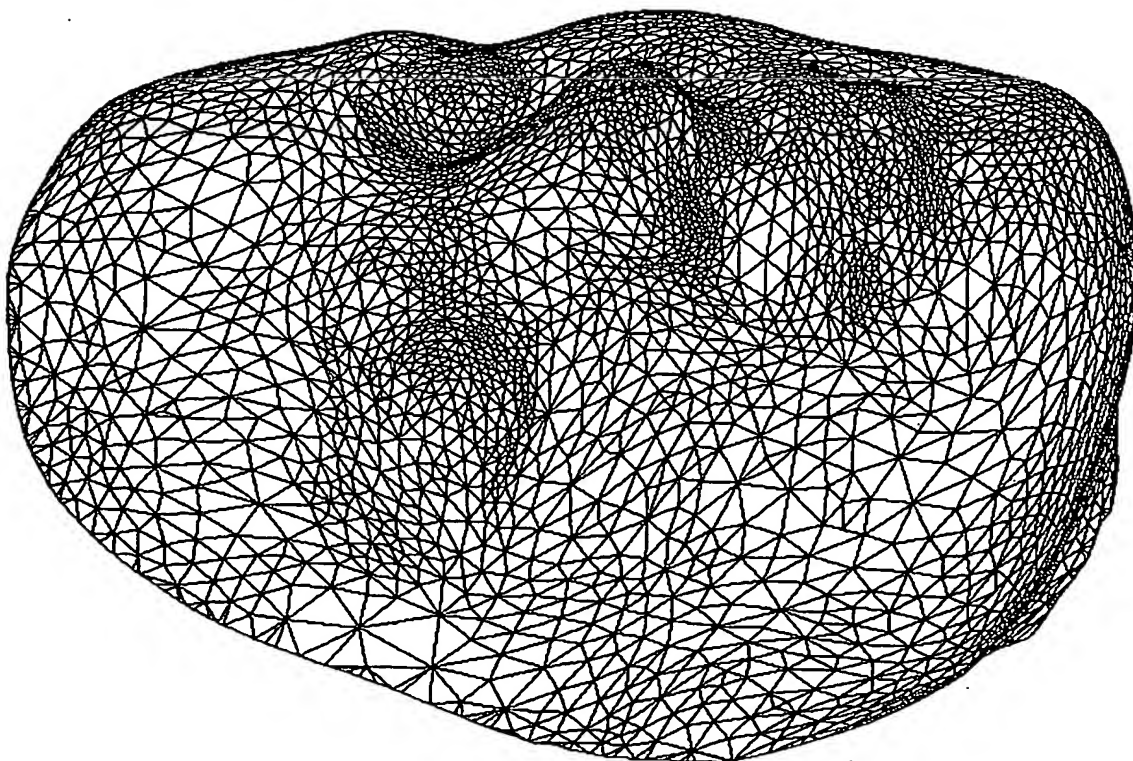


FIG. 3

Fig. 5c

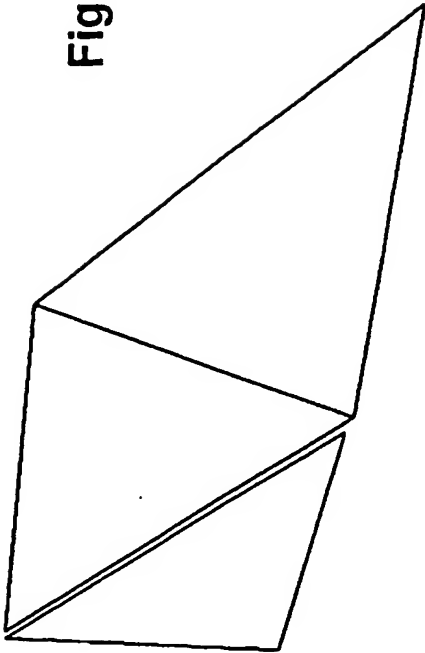


Fig. 5d

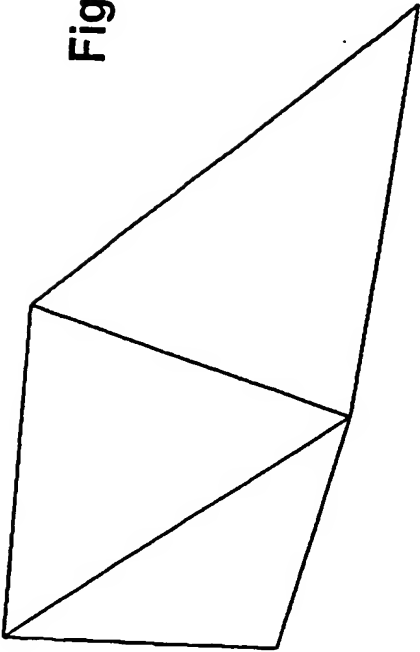


Fig. 5a

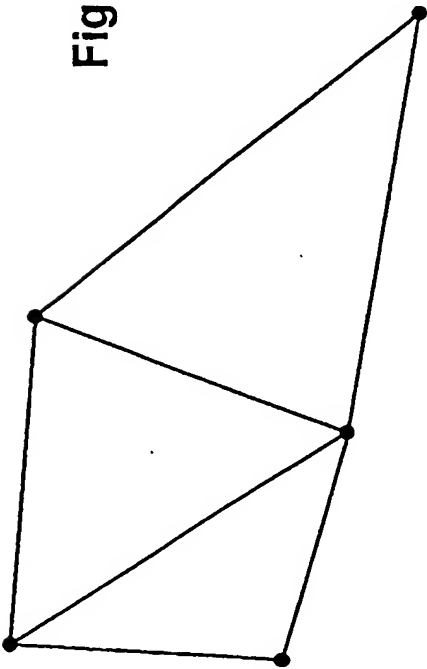
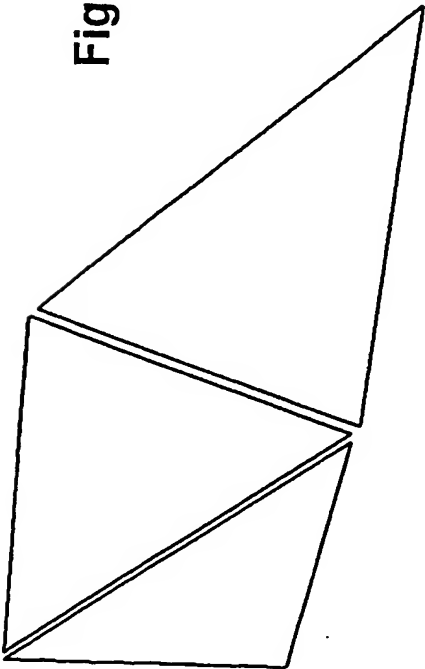


Fig. 5b



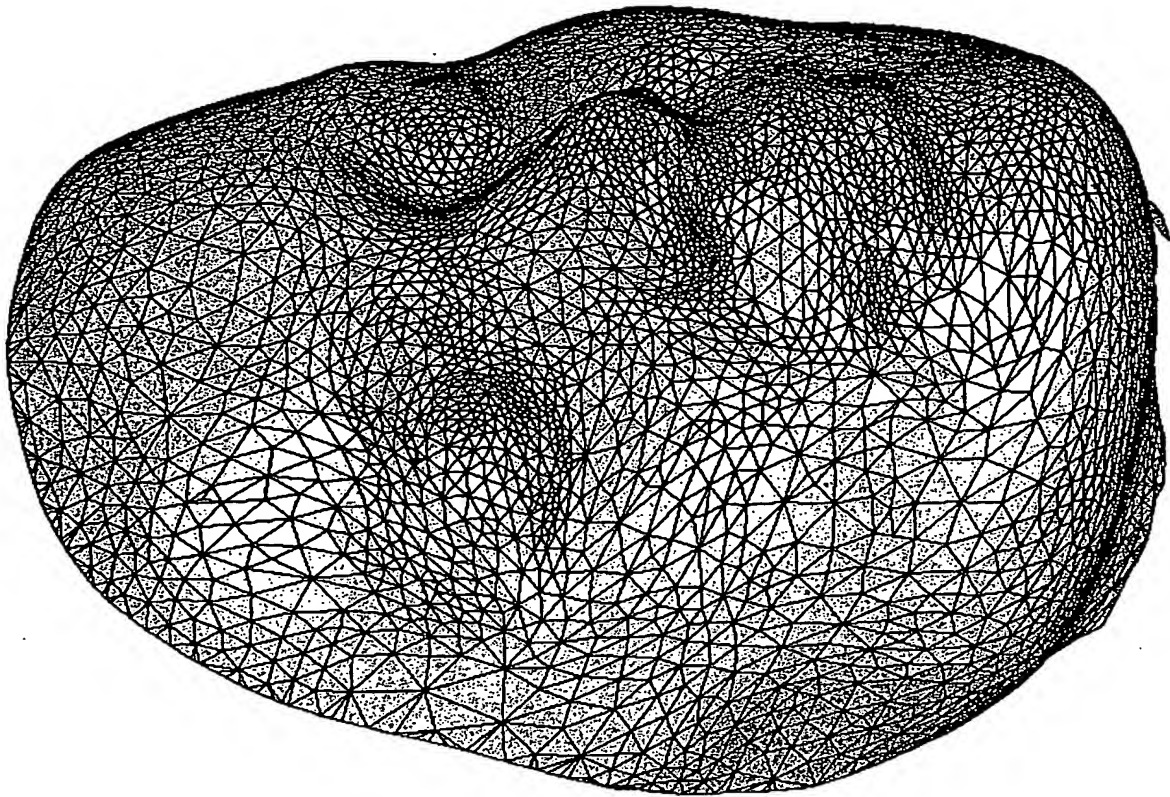


FIG. 7

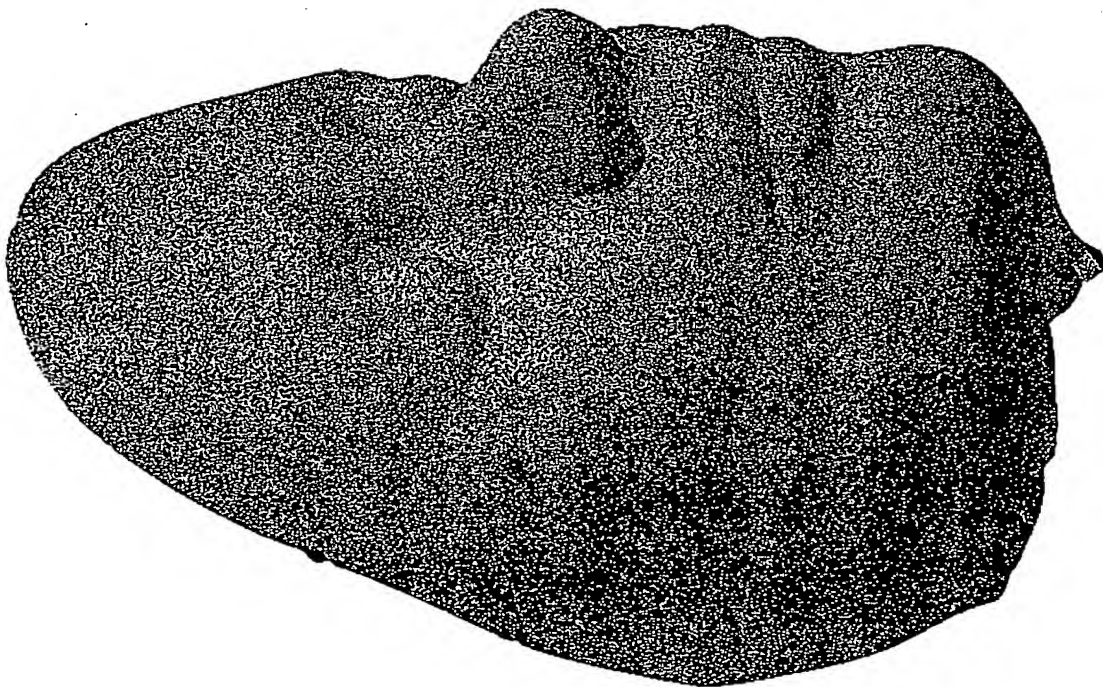


FIG. 6

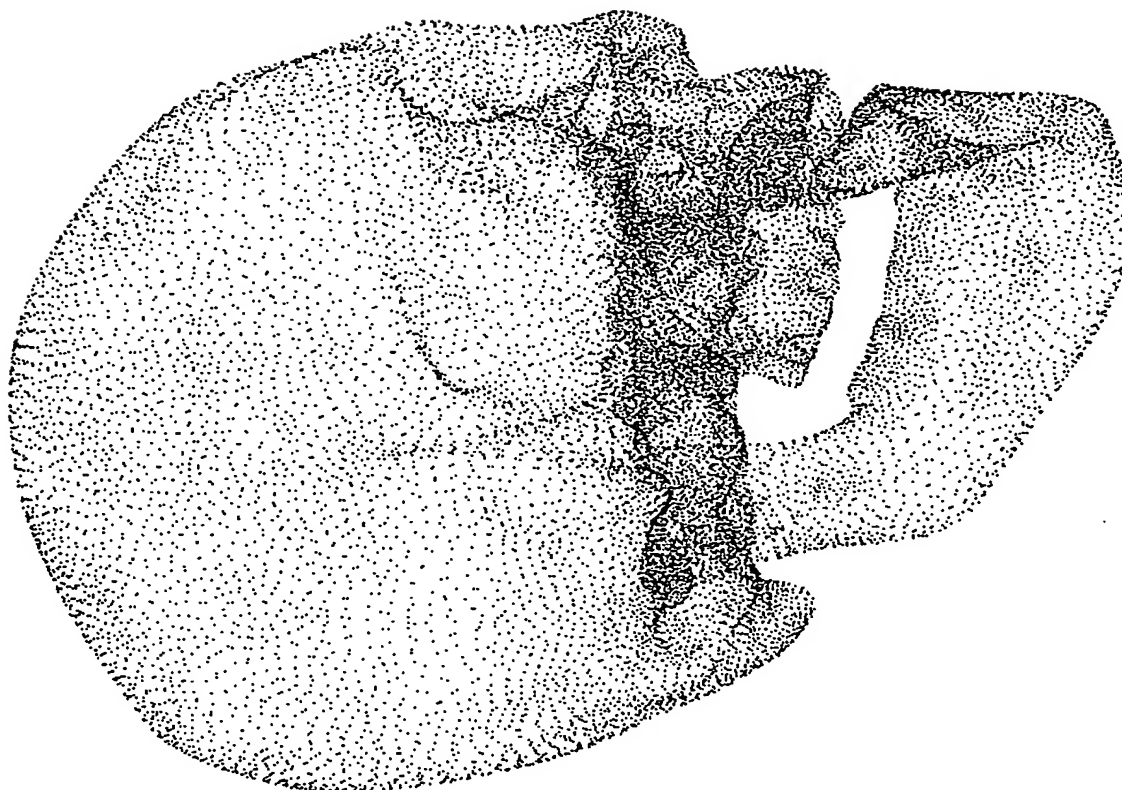


FIG. 9



FIG. 8



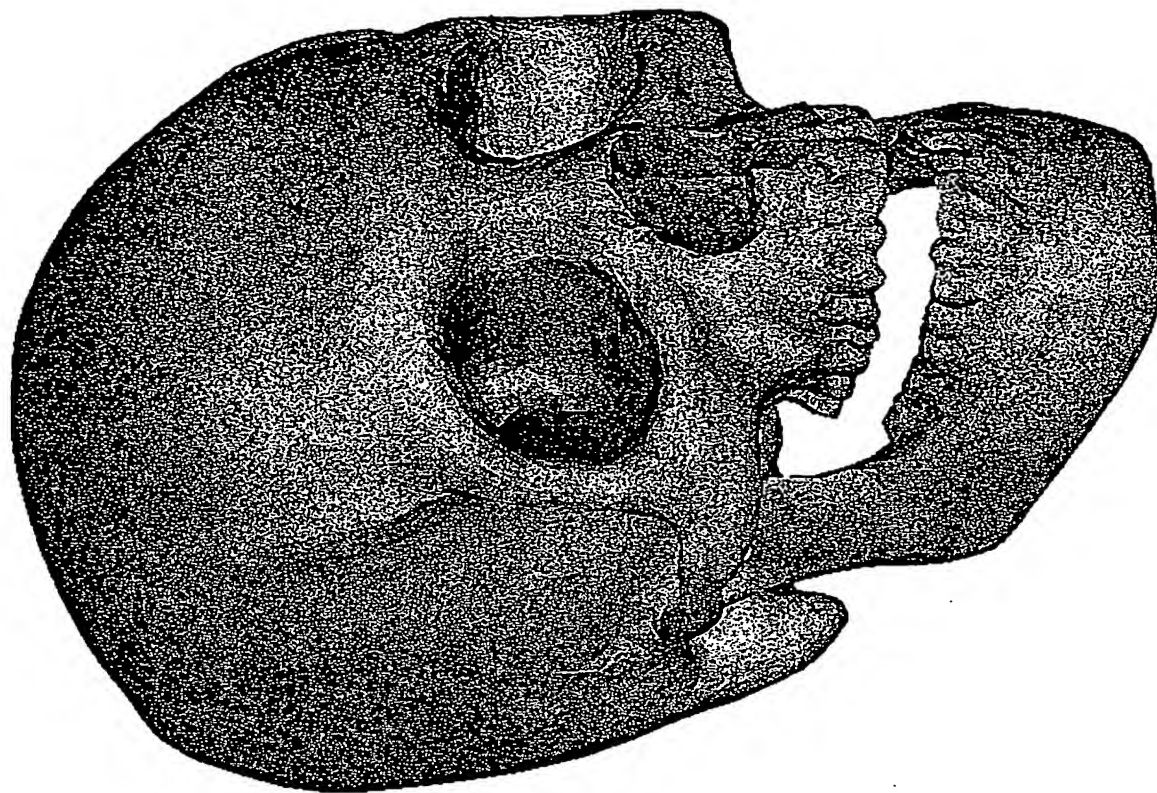


FIG. 11

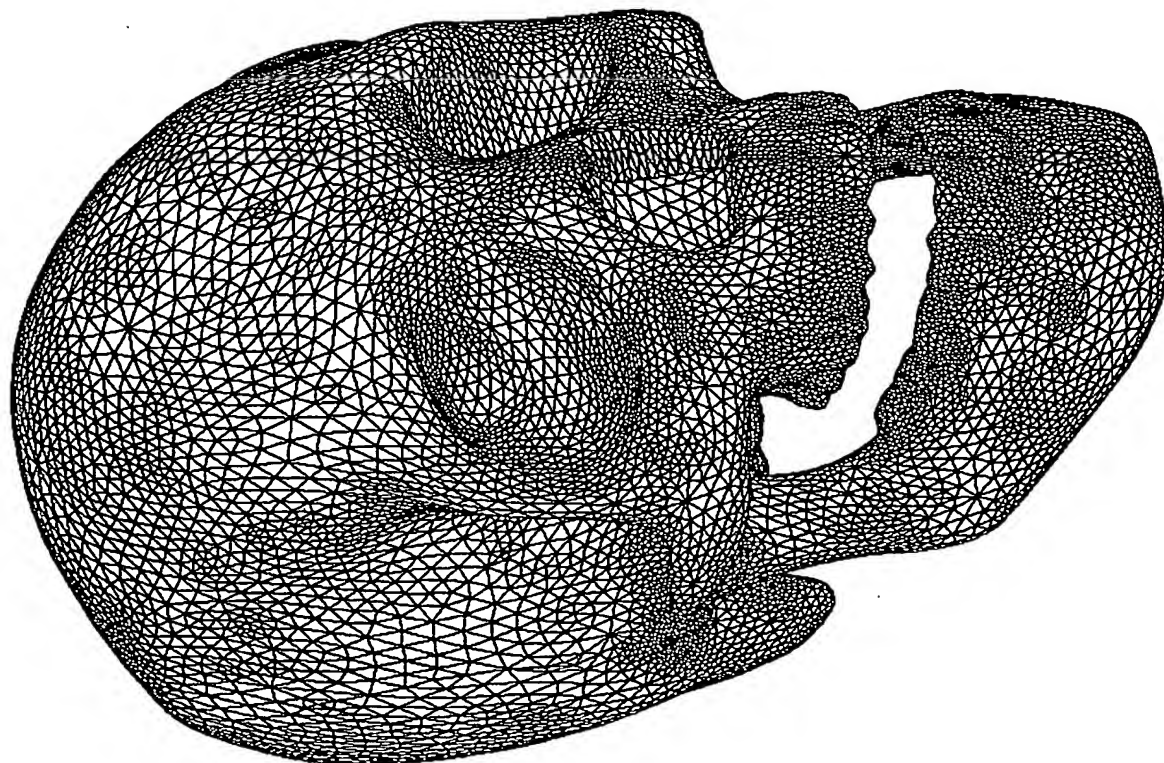
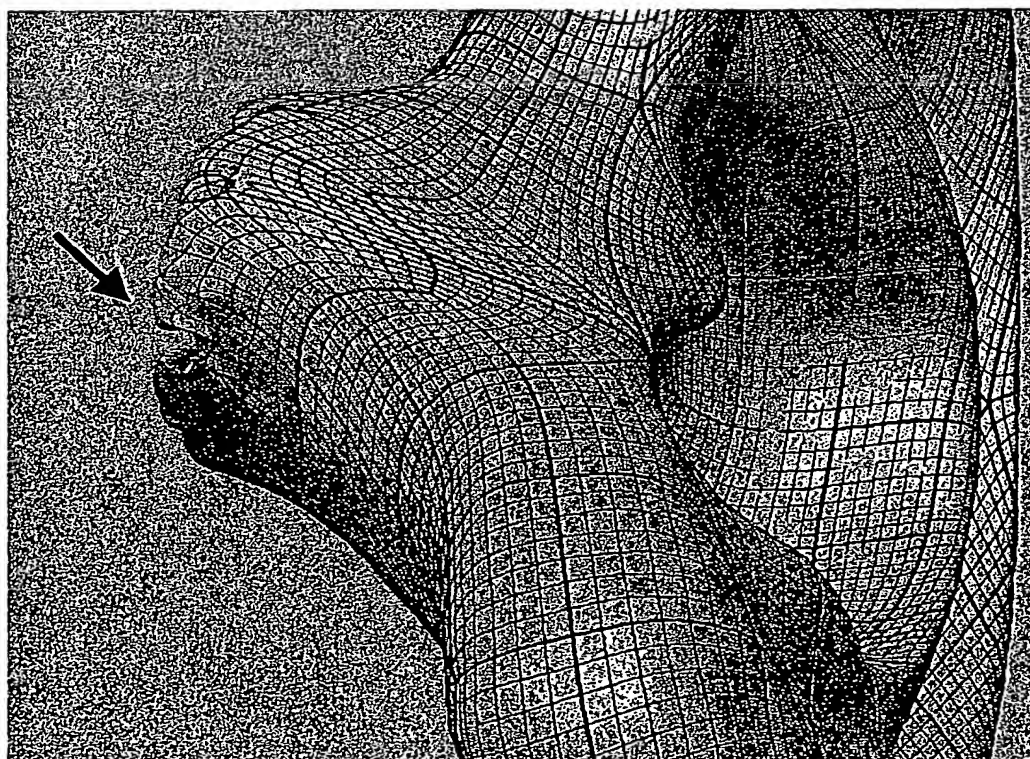


FIG. 10

Fig. 12a



Fig. 12b



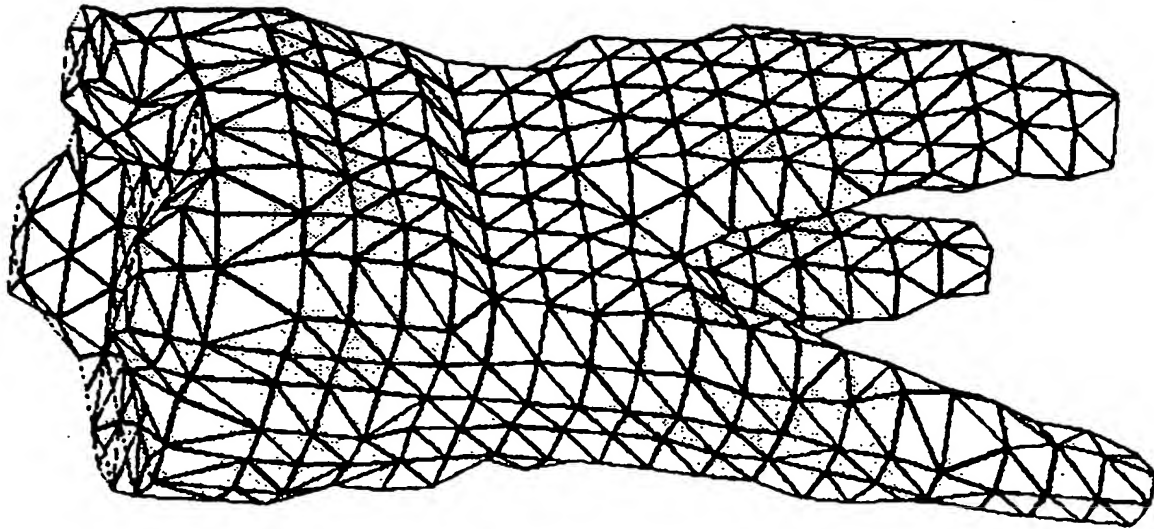


FIG. 14

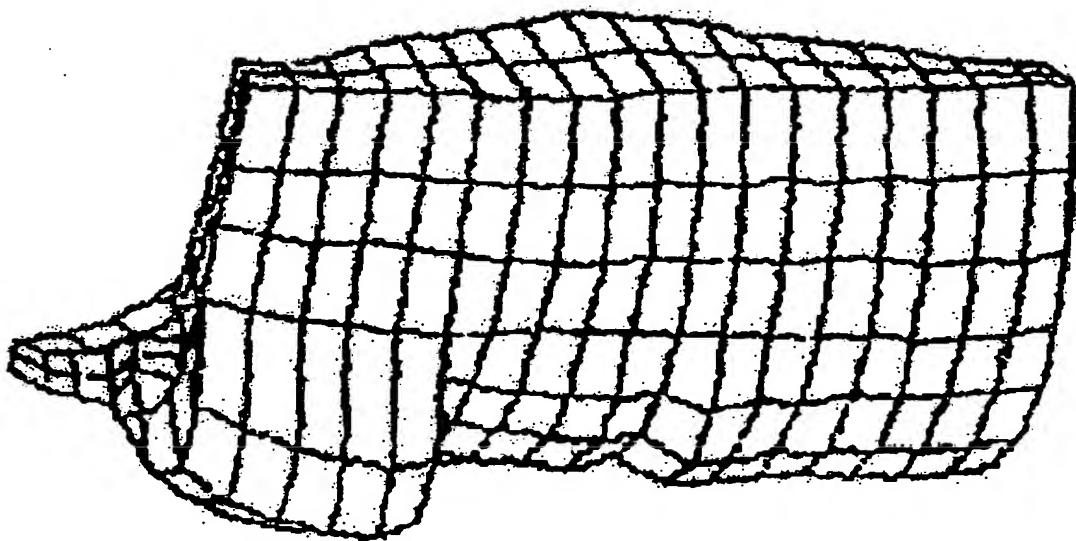


FIG. 13



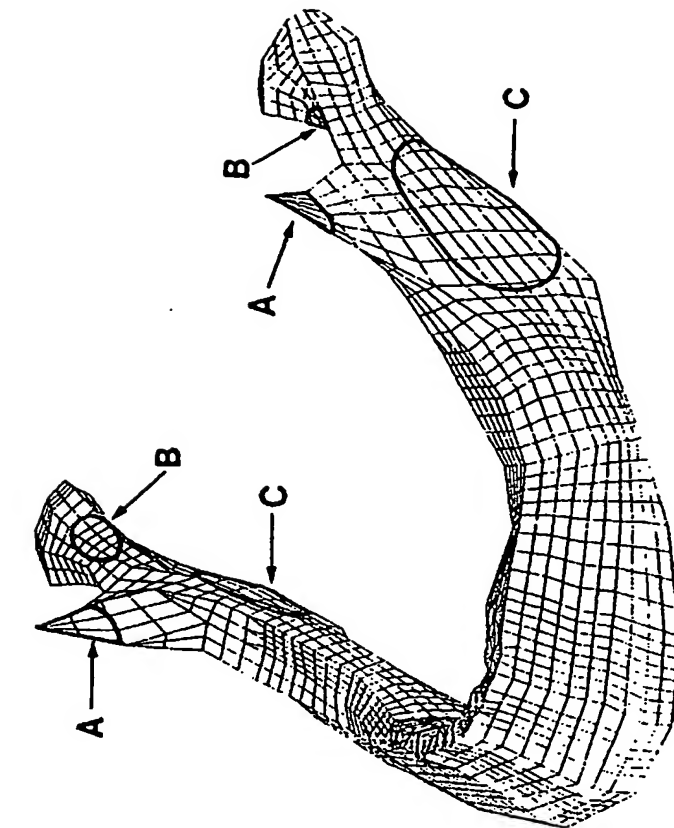


FIG. 16

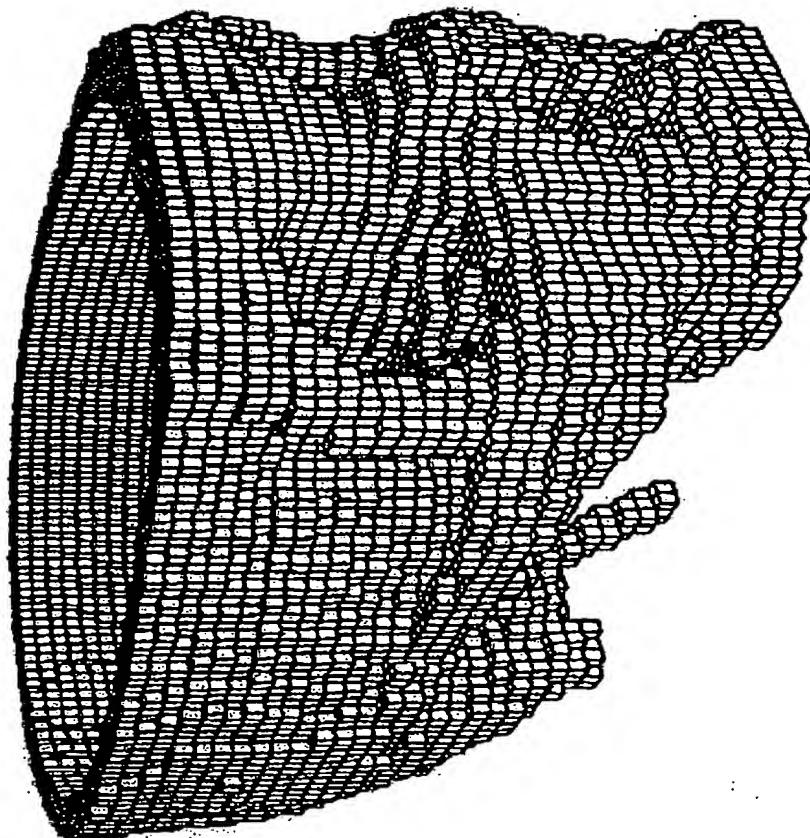


FIG. 15

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**